

KERUSAKAN AKIBAT GEMPA DAN METODE PERBAIKAN ELEMEN STRUKTUR PASCA GEMPA

I Ketut Sulendra *

Abstract

In the last decade a large number of reinforced concrete structures have been damage due to earthquakes. Several examples of the repair and/or strengthening of the reinforced concrete buildings had been reported in the literature. The proposed repairing in this reseach was local repaired e.i beam-column joint and foundation-column joint. The repairing proposed exhibite good performance structural behavior e.i loads, stiffness and disipations energy. The proposed technique for repairing reinforced concrete elements structure proven to be effective method to repaired of this structural element.

Keywords: *Joints, repairing, structural behavior.*

Abstrak

Pada masa lalu banyak bangunan mengalami kerusakan akibat gempa. Beberapa contoh dari perbaikan dan/atau perkuatan dari gedung beton bertulang telah dilaporkan dalam beberapa literatur. Metode perbaikan yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu perbaikan setempat meliputi perbaikan join balok-kolom serta perbaikan join fondasi-kolom. Metode yang diusulkan serta hasil yang diperoleh menunjukkan perbaikan perilaku struktural yang efektif, ditinjau dari kekuatan, kekakuan serta disipasi energi dari elemen struktur yang ditinjau. Teknik perbaikan yang diusulkan pada elemen-elemen struktur tersebut terbukti efektif.

Kata kunci: *join, perbaikan, perilaku struktural*

1. Pendahuluan

Gempa bumi sering menyebabkan kerusakan bangunan. Walaupun telah banyak cara diusahakan agar bangunan tahan gempa, namun sulit dihindari kerusakan pada elemen-elemen struktur.

Tipe kerusakan yang terjadi pada struktur beton bertulang umumnya berupa kurangnya daktilitas pada ujung-ujung balok yang disebabkan kelemahan dan kurangnya penulangan pada inti join dan sekitar join serta kerusakan pada ujung-ujung bawah kolom.

Applied Technology Council Amerika Serikat menyarankan kategori perencanaan gedung tahan gempa yaitu: gedung mampu menahan gempa kecil tanpa kerusakan, mampu menahan gempa sedang tanpa kerusakan struktur, dan mampu menahan gempa besar tanpa runtuh

walaupun mengalami kerusakan struktur yang berat.

Teknik-teknik perbaikan join struktur beton bertulang berdasarkan UNIDO (United Nation Industrial Development Organization) menyarankan perbaikan setempat pada join fondasi-kolom maupun join balok-kolom yaitu:

- a. Kerusakan ringan dapat dilakukan dengan cara penyuntikan epoxy jika struktur tanpa mengalami luluh tulangan atau *spalling* permukaan beton.
- b. Kerusakan sedang sampai berat harus menambah tulangan dan mengupas permukaan beton lama, lekatan beton lama dengan beton baru perlu diperhatikan.

Meskipun peraturan bangunan tahan gempa telah banyak mengalami perubahan namun kondisi dari banyak bangunan lama yang didesain

* Staf Pengajar Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

berdasarkan peraturan sebelumnya menjadi pertimbangan utama untuk diterapkannya metode yang dilakukan pada penelitian ini.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Penelitian yang pernah dilakukan Sebelumnya

Rodrigues dan Park (1994) telah meneliti empat buah kolom bangunan yang didesain sebelum tahun 1970. Kolom diindikasikan mempunyai daktilitas rendah. Setelah diuji dan dilakukan perbaikan dengan perbaikan berupa lapisan beton dan tulangan sengkang ternyata hasil perbaikan menunjukkan peningkatan kekuatan dan kekakuan hingga 300%. Daktilitas juga lebih baik yaitu dengan kemampuan disipasi energi yang lebih besar.

Bett, dkk (1988), meneliti keefektifan pemberian lapisan beton untuk meningkatkan respon beban lateral yang telah rusak akibat gempa. Kolom-kolom tersebut pada mulanya menunjukkan keruntuhan geser dan sangat getas (*brittle*). Metode perbaikan dengan *jacketting* dan penambahan tulangan melintang (*crossties*) memberikan kekuatan dan kekakuan yang lebih baik dibanding sebelum perbaikan.

Bracci dkk (1995) meneliti perilaku perkuatan struktur beton bertulang tiga lantai yang didesain hanya menerima beban gravitasi. *Interior joint* diperkuat dengan lapis penguat beton pratekan dan ditambahkan tulangan yang menembus keempat baloknya. Sedangkan pada kolomnya diperkuat dengan lapis penguat pasangan blok beton pratekan dan ditambahkan tulangan geser untuk meningkatkan daktilitasnya.

Ghobarah dkk (1997) meneliti perkuatan *joint* balok-kolom eksterior beton bertulang dengan menggunakan lapis baja bergelombang (*corrugated*) *joints preretrofit* didesain dengan peraturan lama (tahun 70-an) dengan mengisi daerah perkuatan dengan bahan *grouting* tanpa susut, hasil

penelitian ini mampu meningkatkan daktilitas dan gaya geser *joint*.

Tsonos (1999) meneliti perilaku perbaikan *joint* balok-kolom beton bertulang eksterior (tanpa plat lantai dan balok *spandrel joint* didesain tanpa filosofi kolom kuat-balok lemah. Setelah *joint* mengalami kerusakan berat (*spalling* inti *joint*), perbaikan dilakukan dengan menambahkan tulangan utama kolom dan baloknya, pada inti *joint* dipasang begel sabuk penahan (*collar stirrups*) dari rangkaian plat baja siku. *Joint* pasca *retrofit* menunjukkan peningkatan yang signifikan pada kekuatan, kekakuan dan kapasitas disipasi energi dibandingkan *joint* asli.

2.2 Landasan teori

2.2.1 Kapasitas lentur balok T

Kapasitas lentur balok T sesuai ketentuan SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.5 ayat 1. rasio penulangan actual ditentukan menggunakan lebar badan balok (b_w)

dan bukan lebar efektif flens (b_{ef}).

Kapasitas momen tahanan ditentukan oleh luluhnya tulangan tarik.

$$T = A_s \cdot f_y \dots\dots\dots (1)$$

2.2.2 Kuat geser join (ACI)

$$\phi V_n = \phi \gamma \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_j \cdot h \geq V_u \dots\dots\dots (2)$$

dengan

$$V_u = T - V = \alpha \cdot A_s \cdot f_y - V \dots\dots\dots (3)$$

2.2.3 Kuat geser kolom

Peraturan SNI-03-2487-1992 tentang kuat geser kolom yaitu :

$$V_n = V_c + C_s \dots\dots\dots (4)$$

$$V_s = A_v \cdot f_{yh} \cdot d / s \text{ (Tul. Sengkang)} \dots\dots (5)$$

$$V_s = \pi (2 A_{sh} \cdot f_{sh} \cdot D) / 4s \text{ (Tul. Spiral)} \dots\dots (6)$$

$$V_c = (1 + N_u / 14 A_g) (\sqrt{f'_c} / 6) b_w \cdot d \dots\dots (7)$$

2.2.4 Ductility ratio (μ)

Menunjukkan perbandingan defleksi pada saat beban maksimum

terhadap defleksi pada saat beban luluh.

$$\mu = \Delta_{maks} / \Delta_y \dots\dots\dots(8)$$

2.2.5 Kekakuan (K)

Kekakuan dinyatakan dalam dua bentuk yaitu beban maksimum dibagi rerata defleksi atau rerata beban maksimum dibagi defleksi

2.2.6 Disipasi Energi (μ_E)

Pada penelitian ini digunakan koefisien rerata disipasi energi dari Juir dkk(1992).

$$\mu_E = \frac{E}{n \cdot f_y \cdot A_y} \dots\dots\dots(9)$$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan membuat tiga benda uji berupa *joint* balok-kolom-plat eksterior beton bertulang. Kolom berpenampang 200 x 250 mm^2 dengan tulangan utama 8D12 dan tulangan geser berupa sengkang D8-50 pada daerah dekat inti *joint* dan D8-100 pada daerah lainnya. Panjang total kolom 1750 mm. Balok utama dan balok tepi (*spandrel beams*) berdimensi 150 x 250 mm^2 dengan tulangan tarik 4D12 dan tulangan tekan 2D12, serta tulangan geser sengkang D8-100. Panjang balok utama 1500 mm dari muka kolom dan panjang *spandrel beams* masing-masing 300 mm. Tebal plat lantai 60 mm dengan tulangan dua arah satu lapis D8-150.

Tulangan yang digunakan adalah tulangan polos diameter 8 mm dan 12 mm. beton yang digunakan adalah beton normal. Tulangan utama yang berdiameter 12 mm, $f_y = 326,74$ MPa sedangkan tulangan geser, $f_y = 298,215$ MPa. Mutu beton, $f'_c = 42,37$ MPa. Model berupa balok-kolom-plat sehingga lebih mendekati keadaan di lapangan terutama pada saat *retrofit*.

Pada penelitian perbaikan kolom dibuat 4 (empat) buah kolom

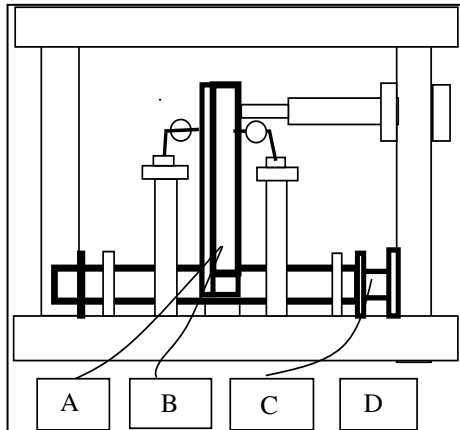
berpenampang persegi 300 mm x 300 mm, dengan tinggi 600 mm. Mutu beton $f'_c = 20,4$ Mpa, tulangan longitudinal $f_y = 327$ Mpa, tulangan sengkang $f_y = 248,9$ Mpa. Tulangan longitudinal kolom asli 8D12 dengan sengkang D6-175.

Benda uji ditempatkan pada *reaction frame* pada posisi *down position*. Kolom dibebani dengan beban aksial konstan 36 ton (sekitar 0,18 f_c, A_g) yang mewakili beban gravitasi.

Beban ditimbulkan dari *hydraulic jack* kapasitas 50 ton. Balok utama dibebani dengan *hydraulic actuator* kapasitas beban 100 kN dan panjang *stroke* 150 mm. beban diberikan pada jarak 1300 mm dari muka kolom. *Setting-up* pengujian dapat dilihat pada gambar 1 dan gambar 2.

Pengujian dapat dilakukan pada dua tahap, yakni tahap pertama *load controlled*. Tahap ini dimulai setelah semua *setting-up* pada posisi yang telah ditentukan. Ujung kolom dibebani dengan *hydraulic jack* sebesar 36 ton yang mewakili beban gravitasi, *dial gauge* untuk mengukur defleksi lateral menunjukkan posisi nol serta *strain indicator* yang menunjukkan regangan *strain gauge* juga pada posisi nol. Ujung *hydraulic actuator* ditempatkan pada titik pembebanan pada jarak 1300 mm dari muka kolom dengan posisi mantap (*fixed*) sehingga tidak mempengaruhi bacaan defleksi pada *actuator indicator*.

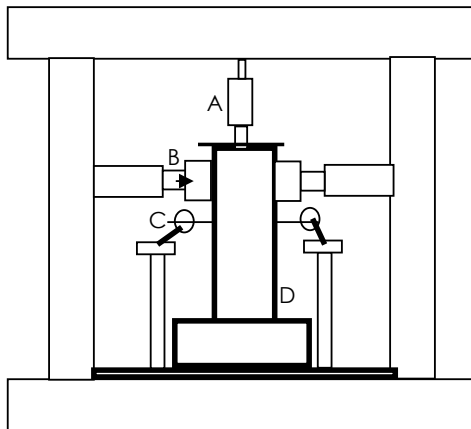
Langkah pertama diberikan beban positif (arah ke atas, dorong pada *actuator*) dengan puncak beban 7,5 kN. Defleksi lateral balok yang ditunjukan oleh *actuator indicator* dan pada kedua *dial gauge* dicatat, regangan pada tulangan utama dan tulangan geser (sengkang) juga dicatat. Beban negatif (arah ke bawah, tarik pada *actuator*) juga diberikan sebesar 7,5 kN untuk mendapatkan satu siklus penuh. Pucak-puncak beban berikutnya 10 kN, 12,5 kN, 15 kN dan seterusnya baik untuk beban positif maupun negatif.



Keterangan :

- A : Strain indicator
- B : Strain indicator tester
- C : Load cell & Hidraulic jack
- D : Hydraulic actuator & Actuator indicator

Gambar 1. Setting-up uji join balok-kolom



- A : Load cell vertikal
- B : Load cell horisontal
- C : Dial gauge
- D : Benda uji kolom

Gambar 2. Setting-up uji join fondasi-kolom

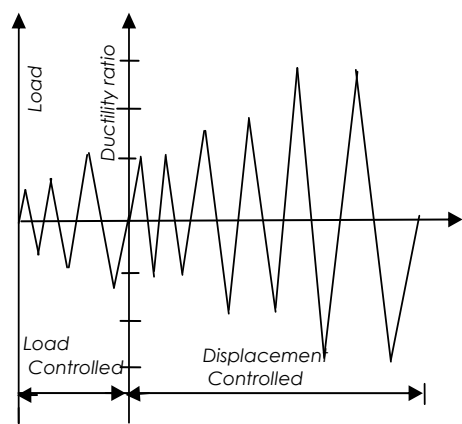
Hal penting yang perlu dicermati adalah terjadinya retak pertama (*first crack*), beban dan defleksi pada beban tersebut harus dicatat serta pola retakan yang terjadi. Beban luluh dan defleksi luluh adalah hal penting selanjutnya diperhatikan, hal ini dapat diketahui dengan menplot langsung grafik hubungan beban-defleksi pada

saat pembebanan. Ketika defleksi luluh (*displacement yield*) telah tercapai maka tahap *load controlled* dihentikan.

Tahap kedua adalah *displacement controlled*, setelah diketahui *displacement yield* dari tahap *load controlled* maka ditetapkan *displacement ductility factor* ($\mu = \Delta / \Delta_y$). Besarnya defleksi yang sesuai dengan *displacement ductility factor* dapat ditentukan dari *actuator indicator* yang menampilkan defleksi dalam bentuk digital serta dapat dipindah dalam tampilan beban dengan tombol pemindah beban-defleksi.

Mengacu pada pembebanan menurut Juir dkk (1992), *displacement ductility factor* adalah 1,5 ; 2 ; 2,5 dan seterusnya. Pada penelitian ini digunakan *displacement ductility* hingga 5 (lima) tiap *displacement ductility* terdiri dari dua siklus pembebanan.

Besarnya beban yang ditunjukkan oleh *actuator indicator*, defleksi lateral balok utama yang ditunjukkan oleh *dial gauge*, regangan tulangan yang ditunjukkan oleh *strain indicator* serta pola dan lebar retakan terus dicatat pada tiap-tiap siklus pembebanan pada tahap *displacement controlled* ini.



Gambar 3. Pola pembebanan

Semua *joint* setelah diuji dilakukan perbaikan, karena kerusakan yang terjadi adalah gagal lentur hanya balok

utama yang rusak. Balok utama dikupas hingga tulangan sengkangnya terlihat. Panjang pengupasan tergantung panjang retak dari muka kolom. Tulang utama tambahan dipasang dengan melubangi plat lantai. Untuk meningkatkan lekatan (*bonding*) antara tulangan tambahan dengan beton lama dilakukan penyuntikan *epoxy resin* untuk mengisi rongga di sekitar lubang.

Tahap dan cara pengujian benda uji asli sama dengan benda uji *retrofit*. Pengujian benda uji *retrofit* dihentikan hingga mencapai *displacement ductility factor* 5 (lima).

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Beban maksimum join

Hasil defleksi pada beban *first crack* disajikan pada Tabel 1.

Table 1. Defleksi beban maksimum dan beban luluh join balok-kolom

Kode	Beban puncak (kN)		Beban rerata (kN)	
	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)
J-1	17.50	-29.22	18.59	-27.96
J-2	18.70	-27.75		
J-3	19.58	-26.90		

Table 2. Defleksi beban *first crack* dan beban luluh join fondasi-kolom

Benda uji	Beban lateral (ton)	Rata-rata (ton)
KA-1	16,00	16,10
KA-2	15,60	
KA-3	16,50	
KA-4	16,25	

Pada pengujian kolom, beban lateral asli rerata 16,10 ton. Setelah beban maksimum 18 ton tercapai kolom

tiba-tiba mengalami penurunan beban yang drastis.

Puncak-puncak beban positif dan negatif pada *displacement ductility factor* hingga 5 (lima) adalah seperti pada Tabel 2.

Sama halnya dengan kapasitas beban luluh, kapasitas beban maksimum positif lebih kecil dibandingkan kapasitas beban maksimum negatif, disamping perbedaan jumlah tulangan utama (balok bertulangan tak simetris), Marco Di Franco dkk (1995), dalam penelitiannya menyebutkan tulangan plat memberikan kontribusi yang signifikan pada beban negatif.

4.2 Kapasitas beban maksimum join *retrofit*

Kapasitas beban maksimum positif join *retrofitting* lebih besar dibandingkan kapasitas beban maksimum join asli. Sedangkan kapasitas maksimum beban negatif join *retrofitting* tidak mengalami perubahan yang signifikan dibanding kapasitas maksimum beban negatif join asli. Beban-beban puncak pada *displacement ductility factor* (μ) hingga 5 (lima), join *retrofit* seperti pada Tabel 3

Tabel 3. Beban join balok-klm *retrofit*

Kode	Beban puncak (kN)		Beban rerata (kN)	
	P(+)	P(-)	P(+)	P(-)
RJ-1	36.61	-32.24	38.34	-31.17
RJ-2	39.50	-29.90		
RJ-3	38.90	-31.38		

Kapasitas beban join fondasi-kolom dapat dilihat pada Tabel 4.

Pada kolom perbaikan (KA-2) diperoleh nilai beban terkecil sebesar 19,85 ton masih lebih besar dibandingkan kemampuan kolom asli.

Tabel 4. Beban mak. join fondasi-kolom

Benda uji	Beban Maksimum (Ton)	Beban Teoritis (Ton)
KA-2R	19,85	20,67
KA-3R	23,11	20,67
KA-4R	24,88	20,67

4.3 Perbandingan beban setiap ductility ratio

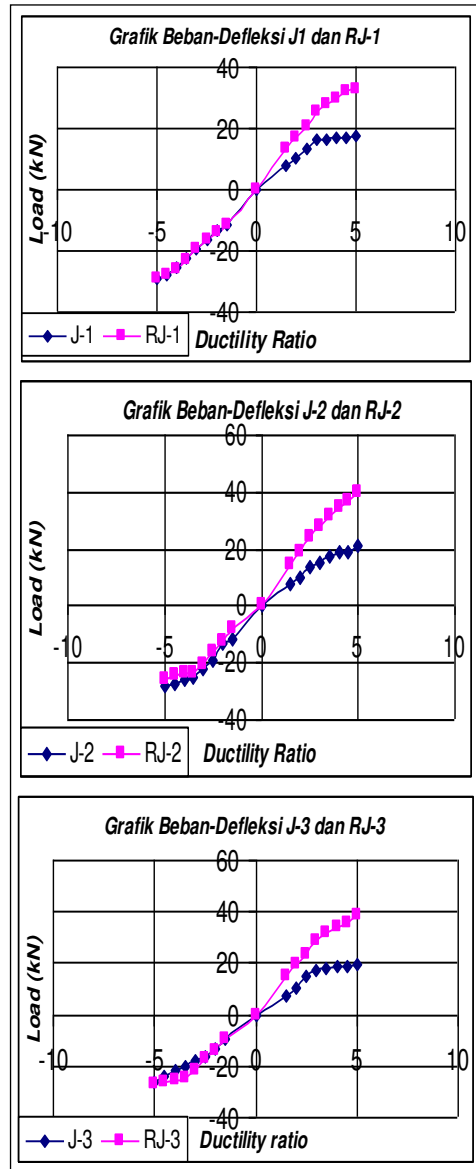
Join memperlihatkan trend yang sama yaitu peningkatan kapasitas beban lateral positif, sedangkan kapasitas beban negatifnya tidak mengalami perubahan yang signifikan setelah mengalami perbaikan. Join asli setelah *displacement ductility* setelah rasio 4 (empat) tidak mengalami peningkatan beban lateral yang signifikan. Sedangkan pada *retrofitting joints* peningkatan beban lateral hingga *displacement ductility* rasio 5 (lima) masih terjadi walaupun relatif kecil

Trend *hysteresis loops* menunjukkan join asli dengan beban negatif yang lebih besar serta disipasi energi yang lebih kecil. Pada *retrofitting joints* menunjukkan perilaku yang sebaliknya beban positif yang lebih besar. *Hysteresis loops* masing-masing benda uji disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Perbandingan regangan *strain gauge* dengan regangan baja tulangan hasil uji tarik menunjukkan kegagalan luluh tulangan longitudinal balok utama. Tulangan geser (sengkang) sampai beban maksimum belum mengalami luluh.

Hysteresis loops join asli menunjukkan trend lebih besar pada beban positif, dengan kekakuan yang menurun relative besar setiap peningkatan *ductility ratio*. Sebaliknya yang terjadi pada beban negative.

Hysteresis loops retrofitting joint pada arah positif maupun negatif mengalami peningkatan yang signifikan terutama pada arah beban negatifnya



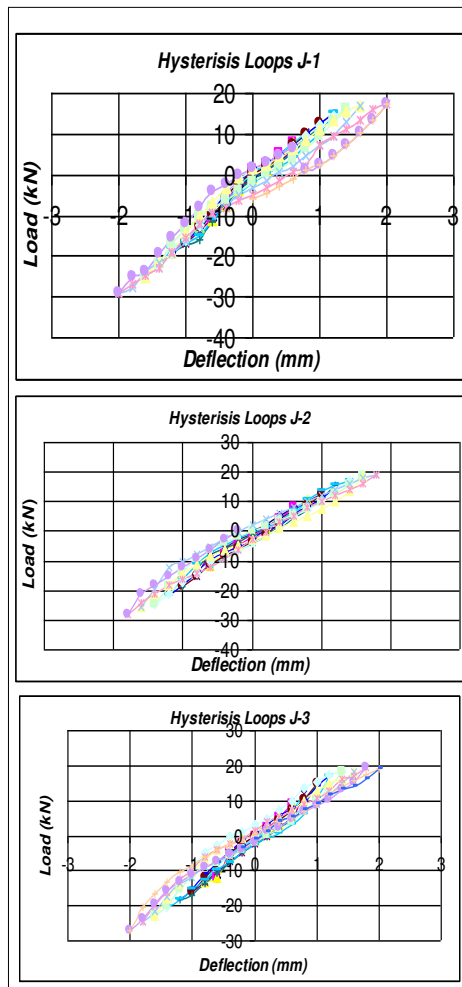
Gambar 4. Hubungan beban-defleksi

4.4 Degradasi kekakuan

Degradasi kekakuan join asli maupun *retrofitting joints* terjadi secara gradual, ini menunjukkan balok cukup kuat untuk menahan beban siklik. Setelah perbaikan kekakuan pada arah beban positif meningkat secara

signifikan, sedangkan pada arah beban negatif hanya mampu mengembalikan kekakuan joint seperti pada keadaan sebelum rusak.

Degradasi kekakuan pada setiap puncak *ductility ratio* untuk masing-masing benda uji disajikan pada Gambar 8.

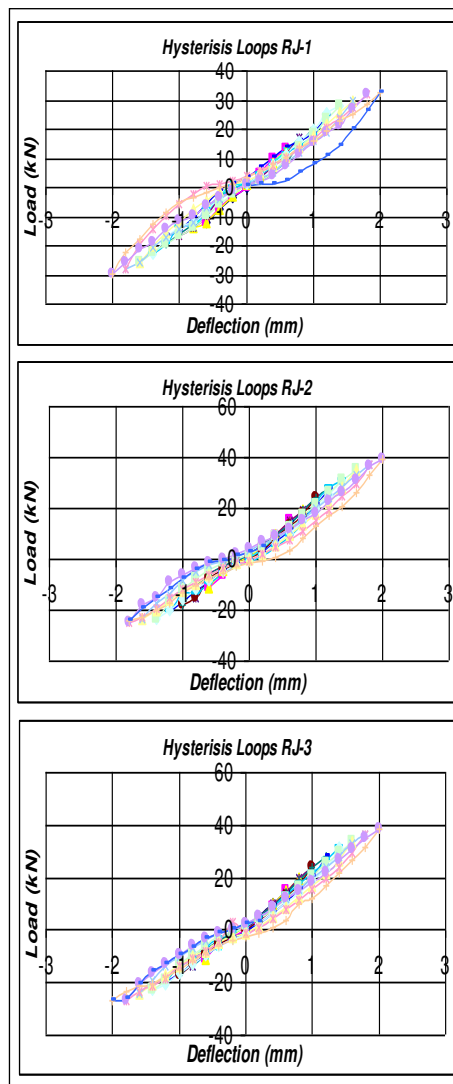


Gambar 5. Hysterisis loops joint asli

4.5 Pola retak

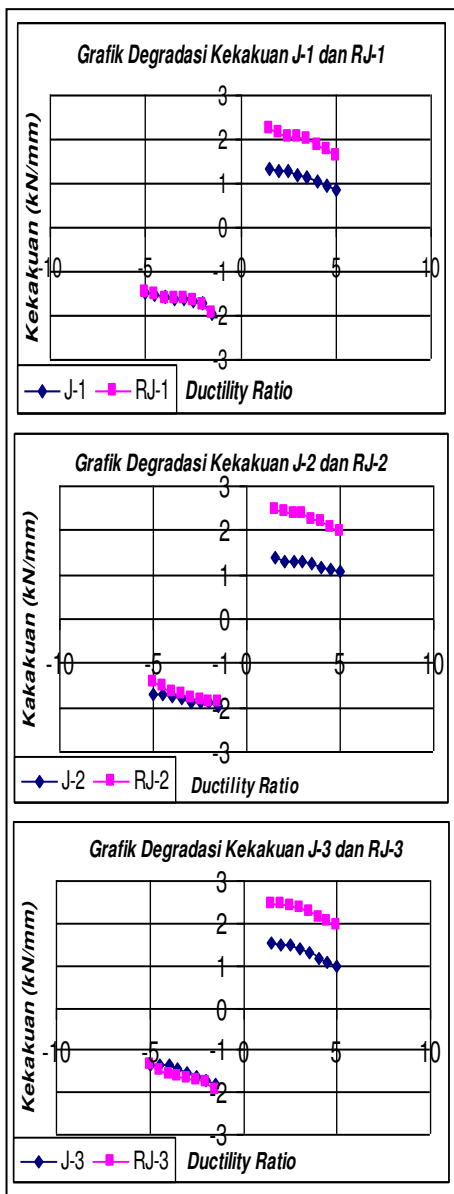
Terjadi kegagalan lentur pada balok utama (daerah sendi plastis). Retak pertama (*first crack*) joint asli terjadi pada beban 11,25 kN dan 15 kN pada joint *retrofit*. Retakan menjauhi daerah sendi plastis terjadi setelah *displacement ductility ratio* 4 (empat). Retakan plat lantai merupakan kelanjutan dari retakan pada balok

utama. Semakin besar *displacement ductility ratio*, semakin lebar dan semakin jauh retakan dari muka kolom.



Gambar 6. Hysterisis loops joint retrofit

Join *retrofit* masih didominasi retak lentur dan kerusakan tidak terjadi pada bagian kolom maupun inti joint, hal ini menunjukkan metode perbaikan yang diusulkan tidak mengubah filosofi balok lemah – kolom kuat. Hal ini berarti metode perbaikan berhasil baik untuk memperbaiki degradasi perilaku struktural di sekitar daerah 2.d (tinggi efektif balok) tanpa mengubah perilaku struktur secara keseluruhan.



Gambar 7. Degradasi kekakuan join

Keruntuhan yang terjadi pada kolom asli adalah keruntuhan geser, retak yang terjadi didominasi oleh retak miring. Kolom mulanya mengalami kegagalan lentur, seiring dengan peningkatan beban, sengkang tidak mampu menahan geser sehingga terjadi retak miring.

Kolom perbaikan masih didominasi retak geser, sampai

pengujian dihentikan belum terjadi keruntuhan sekalipun telah terjadi retak miring sepanjang tinggi kolom.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dikemukakan setelah penelitian ini adalah :

- Metode perbaikan kolom dengan penambahan lapisan beton dan tulangan spiral D6-175, dalam penelitian ini terbukti menahan beban geser sekitar 80% dari kemampuan awalnya.
- Kolom yang diperbaiki dengan metode tersebut *jacketting* dan penambahan tulangan lateral mampu meningkatkan daktilitas dibandingkan kolom aslinya.
- Kekuatan dan kekakuan beban positif pada balok-kolom *retrofitting joints* meningkat secara signifikan yaitu 72.04%, 82.19% dan 81.49 berturut-turut dibandingkan join asli, sedangkan pada beban negative hanya mampu mengembalikan kekuatan seperti pada kekuatan sebelum rusak.
- Disipasi energi meningkat signifikan baik pada beban positif maupun beban negative. Pada beban negative meningkat 79.17%, 62.81% dan 125.81%, sedangkan pada beban positif meningkat 35.54%, 69.31% dan 58.08% dibandingkan join balok-kolom asli.
- Pola retakan pada join asli maupun join perbaikan menunjukkan kegagalan lentur dengan arah retak 90° pada join balok-kolom, serta retakan geser pada kerusakan kolom.

6. Daftar Pustaka

Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structure, (ACI Committee 352), American Concrete Institute, Detroit.

Anonymous, *Crack, Evaluation and Repair Crack in Concrete Structure*, (ACI Committee 224), American Concrete Institute, Detroit.

- Anonim, 1987, *Pedoman Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung*, Departemen Pekerjaan Umum RI., SKBI-1.3.53.1987, Yayasan Penerbit PU, Jakarta.
- Bracci J.M., Reinhord A.M., and Mander J.B., *Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Building Designed for Gravity Loads : Performance of Structure Model*, ACI Structural Journal, 1995, pp. 711-723.
- Ghobarah, Aziz T.S. , and Biddah A., *Rehabilitations of Reinforced Concrete Frame Connection using Corrugated Steel Jacketting*, ACI Structural Journal, 1999, pp. 183-194.
- Masco A. Di Franco, Dennis Mitchell and Patrick Paultre, *Role of Spandrell Beams on Response of Slab-Beam-Column Connections*, Journal of Structural Engineering, March, 1995.
- Srinivas P.Sarma S.B., Laksmann N., and Stangberg F., *Damage Model for Reinforced Concrete Element Under Cyclic Loading*, ACI Structural Journal, 1999, pp. 682-690.
- Tsonos A.G., *Lateral Load Respons of Strengthened Reinforced Concrete Beam-Column Joints*, ACI Structural Journal, 1999, pp. 46-56.
- Wallace J.W., McConnel S.W., Gupta P., and Cote P.A., *Use of Haeded Reinforced in beam-Column Joints Subjected to Eartquake Loads*, ACI Structural Journal, pp. 590-606.
- UCAPAN TERIMA KASIH**
- Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Donny M. Mangitung, M.Sc. (*Doctoral Candidate*) dan Ir. T.A.M. Tilaar, M.Si. yang telah mengarahkan penulis sehingga dapat melanjutkan studi dan mengambil topik penelitian tentang masalah kegempaan. Terima kasih juga disampaikan kepada para laborant pada Laboratorium MM-PAU-IT UGM.